

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-193608

(43)Date of publication of application : 14.07.2000

(51)Int.Cl.

G01N 22/00

(21)Application number : 10-372729

(71)Applicant : MITSUI CHEMICALS INC

(22)Date of filing : 28.12.1998

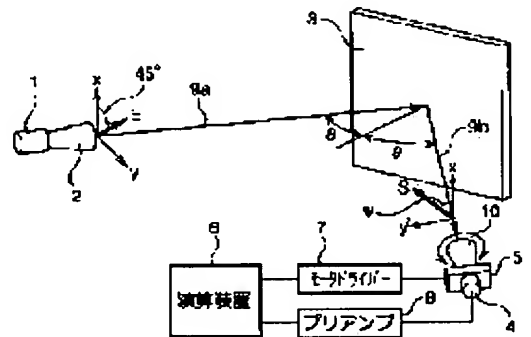
(72)Inventor : TSUZUKIYAMA KOUJI

(54) PERMITTIVITY MEASURING METHOD AND MEASURING DEVICE IN MILLIMETER-WAVE ZONE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To measure the permittivity of a sample inexpensively and simply, dispensing with a network analyzer, an expensive measuring instrument, and without measuring the standard of the amplitude of a reflection coefficient by a metal plate.

SOLUTION: This device is composed of a millimeter-wave source 1 for oscillating electromagnetic waves in a millimeter-wave zone, a polarizer 2 for changing the millimeter-wave into a linearly polarized wave, a sample to be measured 3, a detector 4 for detecting the reflected millimeter-wave, a motor 5 for rotating the detector 4 on the axis of the millimeter-wave, a motor driver 7 for driving the motor 5 controlled by an operating device 6, and a preamplifier 8 for amplifying the signal from the detector 4 and for transmitting it to the operating device 6.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 22.07.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3794848

[Date of registration] 21.04.2006

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-193608

(P2000-193608A)

(43) 公開日 平成12年7月14日 (2000.7.14)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 1 N 22/00

識別記号

F I

G 0 1 N 22/00

テーマコード (参考)

Y

P

R

S

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号

特願平10-372729

(22) 出願日

平成10年12月28日 (1998. 12. 28)

(71) 出願人 000005887

三井化学株式会社

東京都千代田区霞が関三丁目2番5号

(72) 発明者 続山 浩二

千葉県袖ヶ浦市長浦字拓二号580番32 三

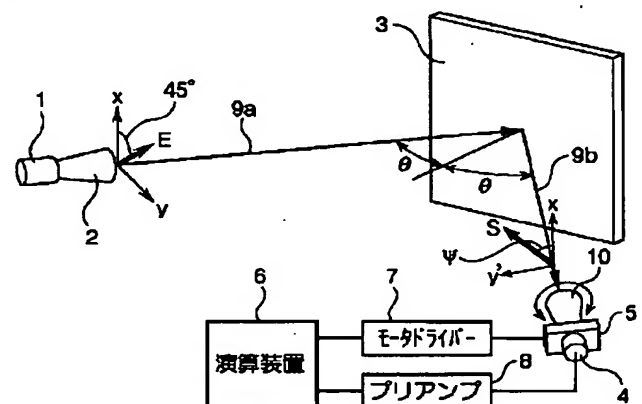
井化学株式会社内

(54) 【発明の名称】 ミリ波帯での誘電率測定方法及び測定装置

(57) 【要約】

【目的】 高価な測定機器であるネットワークアナライザを必要とせず、さらに、金属平板による反射係数の振幅の基準を測定を不要として、安価にまた簡易に試料の誘電率を測定できる方法及び装置を提供することを技術的課題とする。

【構成】 ミリ波帯にある電磁波を発振するミリ波源1、ミリ波を直線偏波にする偏波器2、被測定試料3、反射したミリ波を検出する検出器4、検出器をミリ波の軸上に回転させるモータ5、演算装置6に制御されながらモータを駆動するモータドライバー7、検出器4からの信号を増幅し演算装置に伝達するプリアンプ8から構成される。



(2)

【特許請求の範囲】

【請求項1】自由空間法により誘電体からなる被測定試料のミリ波帯での誘電率を測定する方法において、被測定試料にミリ波帯にある電磁波を照射した時の、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、

この被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出することを特徴とするミリ波帯での誘電率測定方法。

【請求項2】前記電磁波が、電界成分の方向が入射波と反射波で構成する面である入射面に垂直な軸に対してかつ入射波の進行方向と垂直な面内で右回りまたは左回りに45度傾いている直線偏波であり、この直線偏波を前記被測定試料に照射し、

被測定試料で反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との前記比を求めることを特徴とする、請求項1に記載のミリ波帯での誘電率測定方法。

【請求項3】前記電磁波が円偏波であり、この円偏波を被測定試料に照射し、

被測定試料を反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との前記比を求めることを特徴とする、請求項1に記載のミリ波帯での誘電率測定方法。

【請求項4】前記電磁波が、電界成分と磁界成分の位相差が一定周波数 ω で周期的に変化する電磁波であり、この電磁波を被測定試料に照射し、

被測定試料を反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、この検出器によって反射波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分とを測定し、これらの測定値から被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との前記比を求めることを特徴とする、請求項1に記載のミリ波帯での誘電率測定方法。

【請求項5】被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、

被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、

電磁波を直線偏波にする手段と、

被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するため

の、検出感度に偏波依存性がある検出器と、

反射した電磁波軸に垂直な面内で検出器を回転させる回転手段と、

反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有することを特徴とするミリ波帯誘電率測定装置。

【請求項6】被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、

被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、

電磁波を円偏波にする手段と、

被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するため

の、検出感度に偏波依存性がある検出器と、

反射した電磁波軸に垂直な面内で検出器を回転させる回転手段と、

反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有することを特徴とするミリ波帯誘電率測定装置。

【請求項7】被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、

被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、

電磁波の電界成分と磁界成分の位相差を一定周波数 ω で周期的に変化させる位相変調手段と、

被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するため

の、検出感度に偏波依存性がある検出器と、

反射した電磁波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分とを測定する手段と、

反射した電磁波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有することを特徴とするミリ波帯誘電率測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、レーダ装置などの

(3)

3

ミリ波を利用したシステムで使用する各種誘電材料の形状や寸法等を設計するために必要な、各種誘電材料のミリ波帯における誘電率測定方法及び測定装置に関する。

【0002】

【従来の技術】誘電体のミリ波帯での誘電率を測定する方法の一つとして、自由空間法が知られている。この方法は、自由空間に設置された誘電体である被測定試料に電波を照射し、この時の反射係数または透過係数から試料の誘電率を測定する方法であり、同軸・導波管法に比べて被測定試料の加工精度への要求度が小さいという利点がある。この自由空間法には、固定入射角度での反射係数の振幅及び位相を直接測定する方法（機能材料、Vol. 18, No. 10 (1998年) p. 47）や、反射率の角度依存または反射率の試料厚み依存または反射率の周波数依存から誘電率を導出する方法（電子情報通信学会論文誌 B-2, Vol. J80-B-2 No. 10 (1997年) p. 906）等が提案されている。

【0003】このうち前者の固定入射角度での反射係数の振幅と位相を直接測定し、測定した反射係数から誘電*

$$\begin{aligned} \mu_r &= -j \cdot (\lambda_0 \cdot \gamma \cdot Z_0) / (2\pi) \\ \epsilon_r &= -j \cdot (\lambda_0 \cdot \gamma) / (2\pi \cdot Z_0) \end{aligned} \quad \dots (2) \text{式}$$

被測定試料が非磁性体 ($\mu_r = 1$) の場合には、(2) ※ ※式は次の (3) 式のように簡単になる。

$$\epsilon_r = -(\lambda_0 \cdot \gamma / 2\pi)^2 \quad \dots (3) \text{式}$$

被測定試料が磁性体 ($\mu_r \neq 1$) の場合には、2つの異なる背面のインピーダンスでそれぞれの試料のインピーダンスを測定し、ここで得られる連立方程式から被測定試料の特性インピーダンスと伝搬定数を求め、(2) 式から誘電率を計算すれば良い。

【0005】しかしながらこの方法では、反射係数の振幅と位相を同時に測定する必要がある。反射係数の振幅と位相を測定するにはネットワークアナライザ等の高価な測定機器が必要であることが問題である。また、この方法では反射係数の絶対振幅を得る必要があり、そのために被測定試料と同一の面積の金属平板による反射係数を測定し、この金属平板での測定値を使って規格化する★

$$R = R' \{1 - \exp(-j \cdot 2\delta)\} / \{1 - R'^2 \exp(-j \cdot 2\delta)\} \quad \dots (4) \text{式}$$

ここで、

$$\delta = 2 \cdot \pi d / \{\lambda_0 \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

R' は、被測定試料に照射する電磁波がTM波の場合、

$$R' = \{\epsilon_r \cdot (\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} - \epsilon_{Br} \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\} / \{\epsilon_r \cdot (\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} + \epsilon_{Br} \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

被測定試料に照射する電磁波がTE波の場合、

$$R' = \{(\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} - (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\} / \{(\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

実際の測定では電磁波の入射角度 θ 、被測定試料の厚み、または被測定試料に照射する電磁波の周波数を変えて、それぞれの場合でのエネルギー反射率 ($= |R|^2$) を測定し、これらの逆推定問題として被測定試料

4

* 率を導出する方法は、以下の原理に基づく方法である。

【0004】すなわち、平板上の試料に対して電磁波が、例えば固定入射角度として0度で入射したときの反射係数 Γ は、規格化インピーダンス Z_{in} を用いると

(1) 式のように表される。

$$\Gamma = (Z_{in} - 1) / (Z_{in} + 1) \quad \dots (1) \text{式}$$

ここで

$$Z_{in} = Z_0 \cdot (Z_L + Z_0 \tanh \gamma d) / (Z_L + Z_0 \tanh \gamma d)$$

$$\gamma = j \cdot (2\pi / \lambda_0) \cdot (\epsilon_r \cdot \mu_r)^{1/2}$$

Z_L : 被測定試料背面の規格化入力インピーダンス

Z_0 : 被測定試料の特性インピーダンス

γ : 被測定試料の伝搬定数

d : 被測定試料の厚さ

λ_0 : 真空中における電磁波の波長

被測定試料の複素比透磁率 μ_r 、複素比誘電率 ϵ_r は被測定試料の特性インピーダンスと伝搬定数を用いて

(2) 式の様に表される。

★必要がある。このため、被測定試料と金属平板の面積の加工誤差による違いや測定時の設置位置のずれが測定誤差に影響を与えるという問題を有している。

【0006】また、従来の自由空間法による2つめの方法である反射率の角度依存または反射率の試料厚み依存または反射率の周波数依存から誘電率を導出する方法は、裏面媒体（比誘電率 ϵ_{Br} ）の上に比誘電率 ϵ_r の被測定試料がある時の電磁波の反射係数 R が、(4) 式の様に入射角度 θ 、試料厚み d 、電磁波周波数 f [Hz]（または電磁波波長 $\lambda_0 = c / f$ 、ここで c は真空中での光速）の関数として与えられることを利用する。

の比誘電率を導出する。但し、試料の厚みを変える場合には、厚みの異なる試料の比誘電率が同じであることが必要である。また、被測定試料に照射する電磁波の周波数を変える場合は、照射する電磁波周波数の範囲で被測定試料の比誘電率が一定であることが必要になる。

【0007】このように、この方法ではエネルギー反射率の測定だけで済むため、反射係数の振幅と位相を同時に測定するためのネットワークアナライザ等の高価な測定機器が不要である。しかしながら、精度の良い測定を行うために、被測定試料である誘電体の反射率の角度変化または試料厚み変化または周波数変化が大きいものである必要があるが、このためにはおおよその誘電率が予めわかっている必要があるという問題を有している。さらに、この方法では絶対反射率の測定が必要なために、

(4)

5

前記の固定入射角度での反射係数の振幅及び位相を直接測定する方法と同様に、反射係数の絶対振幅を得るために試料と同じ大きさの金属平板を基準試料とする必要があり、この金属平板の大きさと設置位置を被測定試料と同一にしないと測定誤差が生じるという問題がある。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】本発明は前記実情に鑑みて為されたものであって、高価な測定機器であるネットワークアナライザを必要とせず、さらに、金属平板による反射係数の振幅の基準を測定を不要として、安価にまた簡易に試料の誘電率を測定できる方法及び装置を提供することを技術的課題とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は前記課題を解決するために以下の手段を採用した。本発明は、自由空間法により誘電体からなる被測定試料のミリ波帯での誘電率を測定する方法において、被測定試料にミリ波帯にある電磁波を照射した時の、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、この被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定方法である。

【0010】本発明は、前記電磁波が、電界成分の方向が入射波と反射波で構成する面である入射面に垂直な軸に対してかつ入射波の進行方向と垂直な面内で右回りまたは左回りに45度傾いている直線偏波であり、この直線偏波を前記被測定試料に照射し、また被測定試料で反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求めることが望ましい。

【0011】また本発明は、前記電磁波が円偏波であり、この円偏波を被測定試料に照射し、被測定試料を反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求めることが望ましい。

【0012】また本発明は、前記電磁波が、電界成分と磁界成分の位相差が一定周波数 ω で周期的に変化する電磁波であり、この電磁波を被測定試料に照射し、被測定試料を反射した電磁波の強度を検出する検出器として、その検出感度に偏波依存性がある検出器を用い、この検出器によって反射波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分とを測定し、これらの測定値から被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求めることが望ましい。

6

【0013】また本発明は、被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、電磁波を直線偏波にする手段と、被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するための、検出感度に偏波依存性がある検出器と、反射した電磁波軸に垂直な面内で検出器を回転させる回転手段と、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有するミリ波帯誘電率測定装置である。

【0014】また本発明は、被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、電磁波を円偏波にする手段と、被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するための、検出感度に偏波依存性がある検出器と、反射した電磁波軸に垂直な面内で検出器を回転させる回転手段と、反射した電磁波の進行方向に対して垂直な面内での検出器における偏波依存方向の方位とその方位の時に検出される電磁波強度との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有するミリ波帯誘電率測定装置である。

【0015】また本発明は、被測定試料に照射したミリ波帯にある電磁波のTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を導出するミリ波帯での誘電率測定装置であって、被測定試料に照射するミリ波帯の電磁波を発生する電磁波源と、電磁波の電界成分と磁界成分の位相差を一定周波数 ω で周期的に変化させる位相変調手段と、被測定試料から反射した電磁波の強度を検出するための、検出感度に偏波依存性がある検出器と、反射した電磁波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分とを測定する手段と、反射した電磁波の電磁波強度の直流成分と周波数 ω の交流成分と周波数 2ω の交流成分との関係から、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、さらに、被測定試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比から被測定試料の誘電率を計算する演算手段と有するミリ波帯誘電率測定装置である。

【0016】本発明による誘電率測定法に関し、その原理を説明する。裏面媒体（比誘電率 ϵ_{br} ）の上に比誘電率 ϵ_r の被測定試料がある時の電磁波の反射係数Rは

50

(5)

7

次の(5)式で与えられる。

$$R = R' \{1 - \exp(-j \cdot 2\delta)\} / \{1 - R'^2 \exp(-j \cdot 2\delta)\} \quad \dots (5) \text{式}$$

ここで、

$$\delta = 2\pi d / \{\lambda_0 \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

R' は、被測定試料に照射する電磁波がTM波の場合、

$$R' = \{\epsilon_r \cdot (\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} - \epsilon_{Br} \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\} / \{\epsilon_r \cdot (\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} + \epsilon_{Br} \cdot (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

*

$$R_{TM} = |R_{TM}| \cdot \exp(j \cdot \phi_{TM}) \quad \dots (6) \text{式}$$

TE波の反射係数R_{TE}を、

$$R_{TE} = |R_{TE}| \cdot \exp(j \cdot \phi_{TE}) \quad \dots (7) \text{式}$$

として、これら反射係数の比を次の(8)式で定義す ※ ※る。

$$R_{TM}/R_{TE} = |R_{TM}/R_{TE}| \cdot \exp\{j \cdot (\phi_{TM} - \phi_{TE})\} \\ \equiv \tan \Psi \cdot \exp(j \Delta) \quad \dots (8) \text{式}$$

このようにTM波とTE波の反射率の比を表わすΨとΔが分かれば、逆推定問題として被測定試料の誘電率を測定することができる。本発明によれば、ネットワークアナライザなどの高価な測定装置を用いずに、簡便な装置により、ミリ波帯での誘電率を精度よく測定することができる。

【0017】

【発明の実施の形態】ミリ波帯での誘電率を求めるための、ΨとΔを測定する方法として、以下の方法を採用した。

【第1の実施形態】本発明の第1の実施の形態を図1を用いて説明する。図1は本実施形態の装置の概要を示しており、ミリ波帯にある電磁波（以後ミリ波と呼ぶ）を発振するミリ波源1、ミリ波を直線偏波にする偏波器2、被測定試料3、反射したミリ波を検出する検出器4、検出器をミリ波の軸上に回転させるモータ5、演算装置6に制御されながらモータを駆動するモータドライバ7、検出器4からの信号を増幅し演算装置に伝達するプリアンプ8から構成される。この装置を用いた時の測定の原理について説明する。今入射波と反射波で構成する面である入射面に対して垂直な方向をx軸とする。★

$$E = E_0 (1 - \cos 2\Psi \cdot \cos 2\psi + \sin 2\psi \cdot \cos \Delta \cdot \sin 2\Psi) \\ \times \{1 + \sum [a_n \cdot \cos(n\psi) + b_n \cdot \sin(n\psi)]\} \quad \dots (9) \text{式}$$

(9)式における $\{1 + \sum [a_n \cdot \cos(n\psi) + b_n \cdot \sin(n\psi)]\}$ は、反射ミリ波の軸、検出器の中心軸、検出器の回転中心軸の3つの軸間の軸ずれ及び検出器感度の

【0020】図2は被測定資料として厚さが5mmの紙フェノール基板をアルミニウム板（図示せず）で裏打ちしたものを、紙フェノール基板に60GHzのミリ波を入射角度=60°で入射して、その反射波の電磁波エネルギーEと検出器方位角ψとの関係を測定した例で☆

$$\Psi = (1/2) \cdot \cos^{-1}(-\alpha) \\ \Delta = \cos^{-1}\{\beta / (1 - \alpha^2)^{1/2}\} \quad \dots (10) \text{式}$$

ここで、

$$\alpha = (c_3 \cdot d_2 - d_3 \cdot c_2) / (c_1 \cdot d_2 - d_1 \cdot c_2) \quad \dots (11) \text{式}$$

8

*被測定試料に照射する電磁波がTE波の場合、

$$R' = \{(\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} - (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\} / \{(\epsilon_{Br} - \sin^2 \theta)^{1/2} + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{1/2}\}$$

いま、TM波の反射係数R_{TM}を、

★そして被測定試料3に照射するミリ波として、電界ベクトルEの方向が、進行方向に垂直な面内でx軸に対して右回りまたは左回りに45°傾いている直線偏波8aを用いる。（図1では偏波面がミリ波の進行方向に向かって右回りに45°傾いている場合を示している。）被測定試料で反射したミリ波8bの電磁波エネルギーを測定する検出器4としては検出感度に偏波依存性をもっているものを使用する。

【0018】今、TM波の検出感度が最大となる時の検出器4のx軸方向の回転方位を基準方位とし、この基準方位Sと反射波ミリ波9bの進行方向に垂直な面内のx軸とのなす角を検出器の方位角ψとする。すなわちψが0°または180°の時にTM波の検出感度が最大となり（この時、TE波の検出感度は無くなる）、またψが90°または270°の時にTM波の検出感度が無くなる（この時、TE波の検出感度は最大になる）。

【0019】すると、検出器4の方位角ψと検出器4で検出される反射ミリ波9bの電磁波エネルギーEとの関係は、先のΨ、Δを用いて次の(9)式で表すことができる。

☆ある。この測定結果より、ΨとΔを得ることができ、さらに、このΨとΔから被測定試料3の誘電率を導出することができる。

【0021】検出器の方位角ψと反射ミリ波の電磁波エネルギーEとの関係を測定することによりΨとΔを得る方法をより具体的に示す。検出器の反射ミリ波軸上での1回転をn等分し、n等分したそれぞれの方位角ψ_iで検出した反射ミリ波8bのエネルギーをE_iとすると、Ψ及びΔは次式により計算できる。

$$\beta = (c_3 \cdot d_1 - d_3 \cdot c_1) / (c_2 \cdot d_1 - d_2 \cdot c_1) \quad \dots (12) \text{式}$$

9

・ c 1)

$$c_1 = 2 + a_4 - A_2 \cdot a_2$$

$$c_2 = b_4 - A_2 \cdot b_2$$

$$c_3 = 2 \cdot A_2 - 2 \cdot a_2$$

$$d_1 = b_4 - B_2 \cdot a_2$$

$$d_2 = 2 - a_4 - B_2 \cdot b_2$$

$$d_3 = 2 \cdot B_2 - 2 \cdot b_2$$

$$A_n = 2 \sum E_i \cdot \cos(n\psi_i) / \sum E_i$$

但し、 $n=0, 1, \dots$

$$B_n = 2 \sum E_i \cdot \sin(n\psi_i) / \sum E_i$$

但し、 $n=1, 2, \dots$

演算装置6は、検出器4を反射ミリ波9bの軸対称に回転するためのモータドライバ7から検出器の方位角 ψ と、プリアンプ8を介して検出器からの出力とを収集し、(10)式に従って Ψ および Δ を計算して、本実施の形態で用いた被測定資料で Ψ は 72.511° 、 Δ は 82.437° を得た。さらに、演算装置6は、この Ψ および Δ から(8)式を満足する比測定試料の比誘電率($\epsilon_r = 3.76 + 0.18j$)を求めることができた。

【0022】ミリ波源1としては、誘電率測定を行う周波数のミリ波を発生するものであれば何でも良く、例えば、Gunn発振器またはGunn発振器とマルチプライヤとの組み合わせを使用できる。または、マイクロ波発振器とマルチプライヤとの組み合わせを使用することもできる。また、直線偏波にする偏波器2として、例えば、偏波依存性をもつアンテナ、あるいは矩形導波管を例示できる。さらに、被測定試料に照射する電波の指向性を高めるためにピラミダルホーンアンテナを使用できる。

【0023】検出器4としては、誘電率測定を行う周波数のミリ波のエネルギーを検出できるものであれば良く、例えば、ショットキー・バリヤー・ビーム・リード・ダイオードを用いたものやミキサとショットキー・バリヤー・ビーム・リード・ダイオードとを組み合わせたものが例示される。また、検出器4に偏波依存性を持たせる手段としては、例えば、偏波依存性をもつアンテナや矩形導波管を例示できる。また、検出器の感度を高めるために、検出器にピラミダルホーンアンテナ等のアンテナ10を取り付けることが好ましい。

【0024】検出器4の方位角 ψ とミリ波強度の関係を*

$$E = E_0 (1 - \cos 2\Psi \cdot \cos 2\psi \pm \sin 2\psi \cdot \sin \Delta \cdot \sin 2\Psi) \\ \times \{1 + \sum [a_n \cdot \cos(n\psi) + b_n \cdot \sin(n\psi)]\} \quad \dots (11) \text{式}$$

ここで、 \pm の意味は以下の通り。

「+」の場合は照射するミリ波が右回り円偏波の場合

「-」の場合は照射するミリ波が左回り円偏波の場合

(11)式において、 $\{1 + \sum [a_n \cdot \cos(n\psi) + b_n \cdot \sin(n\psi)]\}$ は、反射ミリ波の軸と検出器の中心軸と検出器の回転中心軸との軸ずれ及び検出器感度の検出器方位依存性を表した項である。よって、検出器14の

(6)

10

*測定するために、検出器4を反射ミリ波の軸の回りに回転させる必要がある。この回転機構としては、回転ステージを用いることができる。特に、モータ駆動の回転ステージを用いることによって自動測定が可能になる。

【0025】この様に、この方法では反射ミリ波9bのエネルギーを測定するだけで Ψ 及び Δ を測定できるため、反射係数の振幅と位相を同時に測定するために必要なネットワークアナライザ等の高価な測定機器が不要である。また、絶対反射率を測定する必要が無いため、被測定試料3と同じ面積の金属平板での反射係数を測定し、この金属平板での測定値を使って規格化する必要が無い。このため、被測定試料3と金属平板の加工誤差による面積の違いや測定時の設置位置のずれによる測定誤差の発生を無くすることができる。本実施の形態は、 Δ が $\pi/2$ または $3\pi/4$ に近いときに精度が高くなる。

【0026】

【第2の実施形態】本発明の第2の実施形態を図2を用いて説明する。図2は本実施形態の装置の概要を示しており、ミリ波を発振するミリ波源11、ミリ波を円偏波にする偏波器12、アルミニウムなどの金属板で裏打ちした被測定試料13、反射したミリ波を検出する検出器14、検出器をミリ波の軸上に回転させるモータ15、演算装置16に制御されながらモータを駆動するモータドライバ17、検出器14からの信号を増幅し演算装置16に伝達するプリアンプ18から構成される。

【0027】この装置を用いた時の測定の原理について説明する。今、被測定試料で反射したミリ波19bのエネルギーを測定する検出器14としては検出感度に偏波依存性をもっているものを使用する。TM波の検出感度が最大となる時の検出器4のx軸方向の回転方位を基準方位とし、この基準方位Sと反射ミリ波の進行方向に垂直な面内でのx軸とのなす角を検出器の方位角 ψ とする。すなわち ψ が 0° または 180° の時にTM波の検出感度が最大となり(この時、TE波の検出感度は無くなる)、また ψ が 90° または 270° の時にTM波の検出感度が無くなる(この時、TE波の検出感度は最大になる)。すると、検出器14の方位角 ψ と検出器14で検出される反射ミリ波18bのエネルギーEとの関係は、先の Ψ 、 Δ を用いて次の(11)式で表すことができる。

40

方位 ψ と反射ミリ波19bのエネルギーEを測定することにより Ψ と Δ を得ることができ、さらに、この Ψ と Δ から被測定試料の誘電率を導出することができる。

【0028】検出器14の方位角 ψ と反射ミリ波19bのエネルギーEを測定することにより Ψ と Δ を得る方法をより具体的に示す。検出器14の反射ミリ波軸上で1回転をn等分し、n等分したそれぞれの方位角 ψ_i で

50

(7)

//

12

検出した反射ミリ波19bのエネルギーを E_i とする * * と、 Ψ 及び Δ は次式により計算できる。

$$\Psi = (1/2) \cdot \cos^{-1}(-\alpha)$$

$$\Delta = \sin^{-1} \{ \pm \beta / (1 - \alpha^2)^{1/2} \}$$

.. (12) 式

ここで、±の意味は以下の通り。

「+」の場合は照射するミリ波が右回り円偏波の場合

「-」の場合は照射するミリ波が左回り円偏波の場合

また、

$$\alpha = (c_3 \cdot d_2 - d_3 \cdot c_2) / (c_1 \cdot d_2 - d_1 \cdot c_2)$$

$$\beta = (c_3 \cdot d_1 - d_3 \cdot c_1) / (c_2 \cdot d_1 - d_2 \cdot c_1)$$

$$c_1 = 2 + a_4 - A_2 \cdot a_2$$

$$c_2 = b_4 - A_2 \cdot b_2$$

$$c_3 = 2 \cdot A_2 - 2 \cdot a_2$$

$$d_1 = b_4 - B_2 \cdot a_2$$

$$d_2 = 2 - a_4 - B_2 \cdot b_2$$

$$d_3 = 2 \cdot B_2 - 2 \cdot b_2$$

$$A_n = 2 \sum E_i \cdot \cos(n\psi_i) / \sum E_i$$

但し、 $n=0, 1, \dots$

$$B_n = 2 \sum E_i \cdot \sin(n\psi_i) / \sum E_i$$

但し、 $n=1, 2, \dots$

演算装置16は、検出器14を反射ミリ波19bの軸対称に回転するためのモータドライバー17から検出器の方位 ψ と、プリアンプ18を介して検出器からの出力とを収集し、(12)式に従って Ψ および Δ を計算する。さらに、演算装置16は、この Ψ および Δ から(8)式を満足する比測定試料の比誘電率を計算して求めることができる。

【0029】本実施の形態では、被測定試料に照射するミリ波として円偏波18aを用いる。円偏波を発生させる手段としては、直線偏波を発生させるミリ波源11と $\pi/4$ の位相差発生器12とを組み合わせたものが例示できる。被測定試料13で反射したミリ波18bのエネルギーを測定する検出器14としては第1の実施の形態と同様に検出感度に偏波依存性をもっているものを使用する。

【0030】この様に、この方法では反射ミリ波のエネルギーを測定するだけで Ψ 及び Δ を測定できるため、反射係数の振幅と位相を同時に測定するために必要なネットワークアナライザ等の高価な測定機器が不要である。※40

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin \omega \cdot t$$

.. (13) 式

すると方位角 45° の検出器24で検出されるミリ波エネルギーの直流成分 E_{DC} と周波数 ω の交流成分 E_ω と周★

★波数 2ω の交流成分 $E_{2\omega}$ は次の(14)式のように表される。

$$E_{DC} = C \cdot 2 \{ 1 + \tan^2 \Psi + (\tan^2 \Psi - 1) J_0(\delta_0) \}$$

$$E_\omega = C \cdot 8 \tan \Psi \cdot \sin \Delta \cdot J_1(\delta_0)$$

$$E_{2\omega} = C \cdot 4 (\tan^2 \Psi - 1) J_2(\delta_0)$$

.. (14)

ここで、

Cは比例定数

J_0 は0次のベッセル関数

J_1 は1次のベッセル関数

J_2 は2次のベッセル関数

特に、 $\delta_0 = 2.405$ の時には $J_0(\delta_0) \approx 0$ となるので、この時、 Ψ 及び Δ は次式(15)により計算できる。

(8)

13

$$\Psi \equiv (1/2) \cos^{-1} \{-1.1560 \cdot (E_{2\omega}/E_{DC})\}$$

$$\Delta \equiv \sin^{-1} \{0.9632 \cdot (E_{\omega}/E_{DC}) / \sin 2\Psi\}$$

検出器でミリ波エネルギーの直流成分 E_{DC} を得るにはブリアンプ28を介して得られる検出器24の出力信号をローパスフィルター31を通過させれば良い。周波数 ω の交流成分 E_{ω} と周波数 2ω の交流成分 $E_{2\omega}$ はそれぞれバンドパスフィルター32、33で得ることができる。またバンドパスフィルターのかわりにロックインアンプを用いてもよい。演算装置26ではミリ波エネルギーの直流成分 E_{DC} と周波数 ω の交流成分 E_{ω} と周波数 2ω の交流成分 $E_{2\omega}$ のそれぞれに比例する信号を入力し、その得られた入力信号を使って(15)式に従って Ψ 及び Δ を計算する。さらに、演算装置26ではこの Ψ および Δ から(8)式を満足する比測定試料の比誘電率を計算する。

【0034】この様に、この方法では反射ミリ波のエネルギーを測定するだけで Ψ 及び Δ を測定できるため、反射係数の振幅と位相を同時に測定するために必要なネットワークアナライザ等の高価な測定機器が不要である。また、絶対反射率を測定する必要が無いため、被測定試料と同じ面積の金属平板での反射係数を測定し、この金属平板での測定値を使って規格化する必要が無い。このため、被測定試料と金属平板の面積の違いや測定時の設置位置のずれがによる測定誤差の発生を無くすることができる。またこの方法では、検出器を回転させる必要がないので、モータなどの回転駆動機構が不要となり、装置が簡便なものになる。

【0035】また、被測定試料に23に照射するミリ波28aの指向性を高めるためにアンテナ25を設けることがのぞましい。そして検出器4Cの感度を高めるため

に、検出器24にアンテナ30を取り付けることが好ましい。

【0036】

【発明の効果】本発明によるミリ波帯での誘電率測定方法及び装置により、高価な測定機器であるネットワークアナライザを必要とせずにミリ波帯の誘電率測定が可能になった。さらに、本発明によるミリ波帯での誘電率測定方法及び装置により、金属平板による反射係数の振幅の基準を測定せずに試料の誘電率測定が可能になった。このことはミリ波帯の誘電材料の開発や誘電素子の設計に大きく寄与する。

【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施の形態に係わる測定装置を示した図である。

【図2】第1の実施の形態における測定例である検出器方位角と電磁波エネルギーの関係を示した図である。

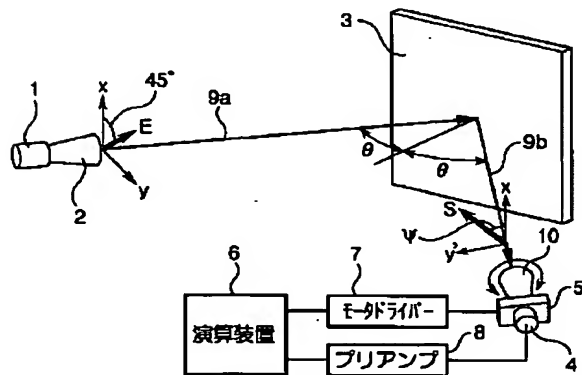
【図3】第2の実施の形態に係わる測定装置を示した図である。

【図4】第3の実施の形態に係わる測定装置を示した図である。

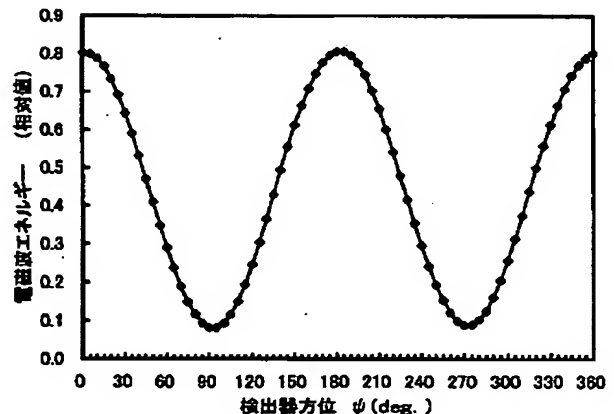
【符号の説明】

- | | |
|-------------|------------|
| 1、11、21 | ・・・ミリ波源 |
| 2、12 | ・・・偏波器 |
| 3、13、23 | ・・・被測定試料 |
| 4、14、24 | ・・・検出器 |
| 5、15 | ・・・モータ |
| 10、20、25、30 | ・・・アンテナ |
| 22 | ・・・フェーズシフタ |

【図1】

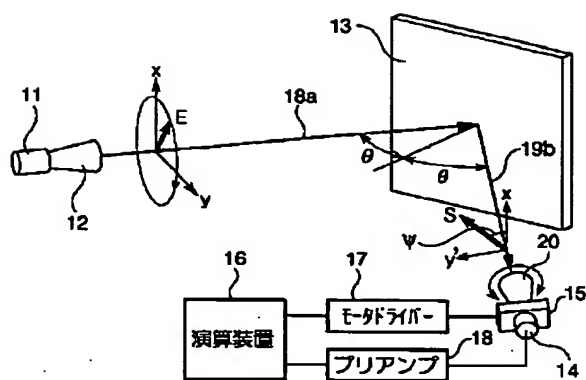


【図2】



(9)

【図3】



【図4】

